

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND
füüsika instituut

Juri Babkin

**SAATJA-VASTUVÕTJA TÜÜPI FOUCAULT' KARDIOGRAAFI
VASTUVÕTUPLOKI EHTAMINE**

Bakalaureusetöö arvutitehnikas (12 EAP)

Juhendajad:

Leo-Henn Humal

Jüri Vedru

Luban töö kaitsmisele:

Juhendaja

.....

/allkiri, kuupäev/

Programmijuht

.....

/allkiri, kuupäev/

Tartu 2012

Sisukord

1.	Sissejuhatus	4
2.	Valdkonna ülevaade	5
2.1	Uurimismeetodid inimese südame tegevuse jälgimiseks	5
2.2	Pöörisvoolude uurimise ja kasutamise ajalugu	5
2.3	Kirjanduse ülevaade	6
2.3.1	Kokkuvõte	8
2.4	Saatja-vastuvõtja tüüpi Foucault' kardiograafi idee: uudsus ja eelised.....	9
2.5	Töö eesmärk ja sellest tulenevad ülesanded	9
3.	Meetodid ja materjalid	11
3.1	FouKG vastuvõtuploki vajalikud omadused ja võimalused realiseerimiseks	11
3.1.1	Signaali detekteerimine	12
3.1.2	Signaalitöötlus	13
3.1.3	Andmevahetus	14
3.1.4	Tulemuste kuvamine	15
3.2	Analoogelektronika funktsionaalsuse simulatsioon	15
3.3	Elektronikakomponentide valik	15
3.4	Mikrokontroller ja selle omadused.....	16
3.5	Tarkvaraarendus	16
3.5.1	Mikrokontrolleri programmeerimine	16
3.5.2	Programmaator	16
3.5.3	Testimistarkvara arvutile	17
3.6	Trasseerimistarkvara	17
4.	Tehtud töö kirjeldus	18
4.1	Montaažiplaadi valmistamine	18
4.1.1	Trasseerimine	18
4.1.2	Jootmine	18
4.2	Mikrokontrolleri tarkvara kirjutamine	19
4.2.1	Programmi silumine ja testimine.....	21
4.3	Haldurarvuti tarkvara kirjutamine	21
5.	Tulemused ja arutelu	23
5.1	Katsetamiseks vajalikud seadmed	23
5.2	Katsetamine	24
5.2.1	Eesmärk.....	24
5.2.2	Saadetava signaali omadused	24
5.2.3	Tulemused	25
5.2.4	Järeldused	28

5.3 Arutelu.....	28
Kokkuvõte.....	29
Summary	30
Kasutatud kirjandus.....	31
Lisad.....	32
Lisa 1	32
Lisa 2.....	33

1. Sissejuhatus

Käesolev bakalaureusetöö on tehtud Tartu Ülikooli füüsika instituudis ja firmas „Humal Elektroonika“. Töö käsitleb nii meditsiinitehnika küsimusi kui ka riistvara ehitamise (projekteerimise) ja tarkvara loomise meetodeid ning kuulub arvutitehnika valdkonda.

Meditisiinis püsib vajadus mitteinvasiivses diagnostilises ja monitooringuvahendi järele, mis võimaldaks jälgida patsientide südame mehaanilist tegevust detailselt, pidevalt ja pikaajaliselt. Sellist vajadust võib rahuldada Foucault' kardiograafia (FouKG) meetod, mida on palju aastaid uuritud ja arendatud Tartu Ülikoolis. Meetod põhineb kõrgsagedusliku magnetvälja poolt indutseeritavate pöörisvoolude energia neeldumise registreerimisel patsiendi uuritavas piirkonnas.

Töö eesmärk on kolme pooliga saatja-vastuvõtja tüüpi Foucault' kardiograafi vastuvõtuploki ehitamises. Idee selleks on pärit Leo-Henn Humalalt. Eesmärgi saavutamiseks oli vaja lahendada mitu ülesannet: ehitada vastuvõtupoolide ja signaalitöötluse süsteem, milles ühes poolis tekkivad võnkumised detekteeritakse ja muundatakse digitaalsele kujule; korraldada andmete esmane töötlus programsel tasemel; organiseerida saatmine haldurarvutisse, kus toimub mõõtetulemuste kuvamine graafikul; katsetada ja testida ehitatud süsteemi.

2. Valdkonna ülevaade

2.1 Uurimismeetodid inimese südame tegevuse jälgimiseks

Meditšiinis on kasutusel mitmeid meetodeid südame mehaanilise tegevuse mitteinvasiivseks jälgimiseks ja uurimiseks. On leiutatud ja tootmisesse lastud meditsiiniseadmed, mis baseeruvad mitmesugustel tehnikatel ja töötavad erinevate printsiipide põhjal. Selles valdkonnas on praegu kasutusel ehhokardiograafia (*EHHO*), impedants-kardiograafia (*IKG*), elektriline impedants-tomograafia (*EIT*) jm.

Ehhokardiograafia võimaldab saada südame ehituse ja tegevuse kujutisi ultraheli abil. Selleks kasutatakse ultraheliandurit, mis kiirgab ultrahelilaineid ning samaaegselt registreerib nende tagasipeegeldumisi. Impedants-kardiograafia (elektrilise impedants-pletüsmograafia variant) korral mõõdetakse rindkere impedantsi muutusi, millest arvutatakse südame tööd kirjeldavaid hemodünaamilisi (seotud verevooluga sisseelundites ja kehakudedes) parameetreid. *IKG* klassikaline variant nõuab nelja lintelektroodi paigutamist ümber kaela ja rindkere, et jälgida impedantsi muutusi. Impedants-tomograafia töötab sarnasel printsiibil, kuid eesmärgiks on rindkereorganite (ajas muutuva) kujutise saamine.

Elektri-impedantsmeetodite hulka kuulub ka Foucault' kardiograafia (*FouKG*), mis on meetod südame mehaanilise tegevuse jälgimiseks; see baseerub südamepiirkonna elektrilise impedantsi muutumise registreerimisel induktsoonvoolude abil. Käesolevas töös on rõhk pandud uue konstruktsiooniga Foucault' kardiograafi ehitamisele, mis võib tulevikus anda oma panuse ka magnetinduktsoon-tomograafiasse.

2.2 Pöörisvoolude uurimise ja kasutamise ajalugu

Pöörisvoolude avastamine on seotud prantsuse teadlase François Arago poolt 1824. aastal tehtud katsega: vaskketas, mis oli paigutatud teljel pöörleva magnetpulga alla, hakkas pöörlema. Paar aastat hiljem seletas seda nähtust Michael Faraday lähtudes tema poolt avastatud elektromagnetilise induktiooni põhiseadusest: pöörlev magnetväli indutseerib vaskketas voolud (pöörisvoolud), mis mõjustuvad magnetpulgaga. Prantsuse füüsik, kes pöörisvoolusid põhjalikult uuris, oli Léon Foucault. Hiljem on mitmetes keeltes neid tema nime järgi hakatud nimetama Foucault' vooludeks.

Foucault avastas, et magnetväljas pöörlevad metallkehad hakkavad pöörisvoolude tõttu soojenema. Seda omandust kasutatakse metalli sulatamiseks spetsiaalsetes sulatamisahjudes ning on kasutusel raviprotseduur keha eri osade soojendamiseks pöörisvooludega, mida nimetatakse induktotermiaks. Kui liikuvates elektrijuhtides tekkivad pöörisvoolud mõjustuvad magnetväljaga, siis toimub juhtmete pidurdamine. Seda nähtust kasutatakse näiteks liikuvate osade pidurdamiseks osutimõõteriistades selleks, et mõõteriista osuti kiiremini stabiliseeruks [1]. Foucault' voolude efekt on leidnud rakendust ka metalliotsijates, mille abil on võimalik otsida maa sees olevaid metallobjekte [2].

2.3 Kirjanduse ülevaade

On tehtud mitmeid katseid inimese kudede juhtivuse registreerimiseks magnetilise induktsiooni abil. Üheks esimestest uurimistöödest selles valdkonnas võib lugeda P. Tarjani ja R. McFee artiklit [3]. Selles töös kirjeldavad nad induktsioonilist juhtivusmõõturit kliiniliste ja eksperimentaaluuringute jaoks, mis reageerib lineaarselt juhtivuse muutustele kehas. Konstruktsioon koosneb kolmepoolilisest diferentsiaaltrafost (üks saatjapool ja kaks vastuvõtupooli), mis on paigaldatud toetavale karkassile. Selleks, et lahti saada soovimatutest elektromagnethäiretest ja vältida täiendava signaalkomponendi teket, kaeti konstruktsioon elektrostaatilise ekraaniga. Selle seadme tööpõhimõte on järgmine: saatjapool on toidetud siinuselise vooluga, mis tekitab ajas muutuva magnetvälja tema läheduses. Vastuvõtupoolid on paigutatud saatjapoolist fikseeritud kaugusele. Kui elektrijuhtiv objekt on asetatud vastuvõtupoolide lähendusesse, siis temas indutseeritud voolud on proportsionaalsed objekti juhtivusega. Need voolud tekitavad omakorda magnetvälja, mis muudab vastuvõtupoolis tekitatud pinget.

Ülalkirjeldatud seadmega mõõdeti inimese rindkere takistust ning selle südamelöökidest ja hingamisest tingitud muutusi. Katsetes, mille puhul katsealune lamas sügavalt sissehinganuna näoga allapoole vastuvõtupooli kohal, selgus, et takistuse pulseerimine, mis toimus südame kokkutõmbumiste sagedusega, sarnanes lainekuju poolest kõveraga, mis kirjeldab töötava südame vatsakeste ruumala muutumist. Takistuse pulsatsiooni amplituud ja kuju muutusid, kui muutus õhu maht kopsudes.

Sarnase uuringu viisid läbi kanadalased R. Guardo, S. Trudelle, A. Adler, C. Boulay ja P. Savard [4]. Nad salvestasid reaalaegajarežiimis südame tegevusega seotud elektrilise juhtivuse muutusi inimese rindkeres. Selleks valmistati ühe-pooliline elektromagnetiline mõõtekomplekt, mis koosnes 3,5 cm raadiusega poolist, 4 MHz ostsillaatorist ja elektroonilisest kõrgsageduslikust voltmeetrist. Anduriga detekteeriti signaali amplituudi muutumine, mis on põhjustatud

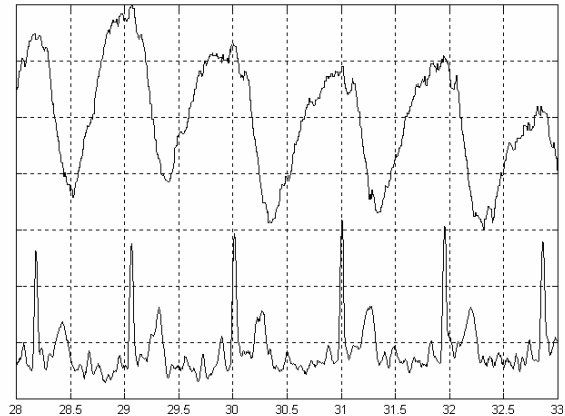
muutuvatest pöörisvoolukadudest südame piirkonnas. Ostsillaatori poolt ergutatav pool tekitab magnetvälja, mis indutseeris pöörisvoolud. Pöörisvoolude tihedus rindkeres kujunes võrdeliselt keskkonna juhtivusega. Sekundaarne magnetväli, mis oli tekitatud pöörisvoolude poolt, vastandus ostsillaatoriga tekitatud primaarväljale. Juhtivuse muudatused, mis oli põhjustatud hingamise ja südametegevuse poolt, moduleerisid ostsillaatori võnkumiste amplituudi, mida mõõdeti kõrgsagedusliku voltmeetriga.

Selle seadme puuduseks võib pidada, et ta reageeris mitte ainult juhtivusele, vaid ka vastuvõtupooli asukoha muutusele anatoomiliste struktuuride suhtes. Oma katsetes veendusid autorid, et saadud signaal oli sarnane kõveraga, mis kirjeldab vasaku vatsakese ruumala muutusi.

Foucault' kardiograafiat on palju aastaid uuritud ja arendatud ka Tartu Ülikoolis. 1998. aastal valmis (autorid Jaanus Trolla ja Leo-Henn Humal) ja katsetati autogeneraator-tüüpi Foucault' kardiograaf [5]. Selle seadmega on võimalik registreerida südame mehaanilist tegevust. Ta sisaldab andurit, milles sensoriks on ühe keeruga pool. Andur paigutatakse patsiendi rindkerele südame kohale ja mõõdab energiakadusid, mis tekivad sensorpoolis tema poolt rindkeres indutseeritud pöörisvoolude tõttu. Pinge amplituud poolis sõltub energia neeldumisest anduri ümbruses ja see muutub, kui muutub vere maht südames.

Kõnesolev seade on etapiks 1960-ndatel aastatel Leo Humala poolt alustatud Foucault' kardiograafia arendustöös. Meetod on mõeldud rakendamiseks meditsiinis, et jälgida südame mehaanilist tegevust, sealhulgas registreerida südame löögimahu ja väljutuse muutumist, mistõttu ta on autorite poolt nimetatud Foucault' kardiograafiks. Selle seadmega saadud kardiogramm on toodud joonisel 1.

Foucault' kardiograafia meetodi eeliseks võib lugeda seda, et Foucault' kardiograafi on kerge kasutada, sest ta ei nõua erilisi ettevalmistusi. Samuti ei ole oluline, kas patsient onriides või lahtiriietunud. Kuna anduril puudub elektriline ühendus inimese kehaga, siis elektrilöögioht on minimaalne. Puuduseks võib lugeda seda, et signaali kalibratsioon on problemaatiline, kuna südame ja anduri vahekaugus ning rindkereorganite geomeetria on igal patsiendil individuaalne.



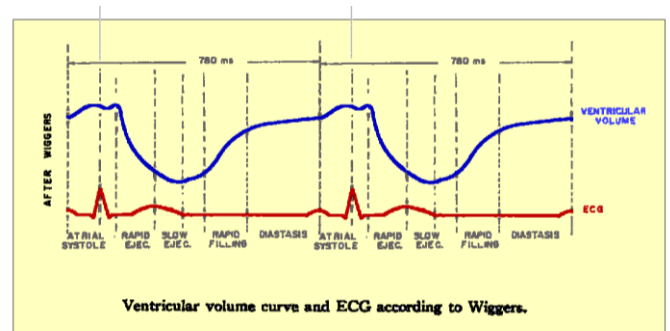
Joonis 1. Foucault' kardiogrammi näide (ülemine kõver) koos elektrokardiogrammiga (alumine kõver). [5]

Autogeneraator-tüüpi andurit inimese kudede juhtivuse mõõtmiseks on esitanud ka J. Heller ja J. R. Feldkamp oma töös [6]. Seade koosneb generaatorist, mille eesmärgiks on väljastada kõrgstabiilset siinuselist pinget konstantse amplituudiga selleks, et toita RCL-rööpvõnkeriingi. Selle ahela induktiivkomponendiks on kahekihiline spiraalpool. Elektri juhtiva objekti paigutamine selle pooli ette põhjustab pinge amplituudi muutumise RCL-ahelas. Sellest ja voolu muutusest on võnkeriingi impedantsi muutus täpselt arvutatav. Kogu seadme tööd reguleerib digitaalsignaaltöötluse protsessor, millel on *Bluetooth*-liides. Viimase kaudu toimub andmevahetus arvutiga ja kaugjuhtimine. Oma katsetes prototüüpseadmega on autorid tulemuslikult uurinud juhtivuse muutumist inimese küünarvarre piirkonnas.

2.3.1 Kokkuvõte

Ülaltoodud seadmete näidetest on hästi näha, et inimese kudede elektri juhtivus (ka takistus) on täiesti mõõdetav pöörivoolude abil. Kasutatud meetodid erinevad üksteisest vähe, nende põhimõtte jääb samaks: keha piirkonda sondeeritakse pooli (ehk induktori) vahelduva magnetvälja poolt indutseeritud pöörivooludega; need voolud tekitavad oma muutuva magnetvälja, mille toime induktori karakteristikutele registreeritakse vastava tehnikaga. Registreerimisel määratakse juhtivuse (impedantsi) või takistuse muutused, mis kirjeldavad hemodünaamilisi protsesse vaadeldavas piirkonnas.

Kirjeldatud seadmed erinevad konstruktsiooni poolest. Tarjani ja McFee [3] katsetes kasutati platvormi, mille peal lamas inimene, seepärast kogu konstruktsioon oli küllaltki suur. R. Guardo ja tema kaasautorite [4] poolt valmistatud seade ja autogeneraator-tüüpi andurid (kirjeldatud artiklites [5] ja [6]) on portatiivsed ning paigutatakse patsiendi rinna peale, kusjuures elektriline kontakt kehaga puudub.



Joonis 2. Vatsakeste ruumala muutumise kõver Wiggersi järgi koos elektrokardiogrammiga.

Uuringutest [3] ja [4] saadud tulemused näitavad, et juhtivuse muutused südame piirkonnas, kui inimene ei hinga, kujutavad vatsakeste ruumala muutusi, mis on tuntud joonisel 2 kujutatud Wiggers'i lainekujuna [7]. Kuna nii vatsakeste kui ka kopsude ruumala muutused mõjuvad rindkere juhtivusele hingamisel, siis Humala ja Trolla [5] katsetes saadud signaali kõver (joonis 1) peaks sisaldama vähemalt neid kaht komponenti, tegelikult mõjuvad saadavale signaalile ka vatsakeste kõrval asuvate kodade ja aordi ruumala muutused.

Toodud seadmete puudusteks võib lugeda seda, et mõõtmise protsessis mõjub väljundsignaalile tugevasti ka anduri asukoha muutumine [7], tekitades artefakte. Samuti mõjuvad signaalile ka keskkonnast päritud elektomagneetilised mürad. Eeliseks on see, et valmistatud seadmed on elektroodideta ja mitteinvasiivsed, st ei nõua spetsiaalsete meditsiinivahendite viimist keha sisse.

2.4 Saatja-vastuvõtja tüüpi Foucault' kardiograafi idee: uudsus ja eelised

Käesolev töö on suunatud uue konstruktsiooniga Foucault' kardiograafi ehitamisele, mille idee on pärit Leo-Henn Humalalt. Tema poolt pakutav seade on saatja-vastuvõtja tüüpi, st koosneb kahte tüüpi plokkidest: saatjaplokk ja vastuvõtjaplokkid. Saatjaploki eesmärgiks on tekitada kõrgsageduslik vahelduv magnetväli, mis põhjustaks saatja asetamisel mõõtmise objekti lähedale viimases pöörisvoolude tekke. Vastuvõtjaplokke võib olla mitu. Nendega registreeritakse kaotakistuse väikeseid muutusi, mis on põhjustatud muutustest pöörisvoolude tugevuses ja nende jaotuses südametegevuse ja hingamise tagajärjel. Vastuvõtjaplokke peab saama ühendada mõõtesüsteemi haldava personaalarvuti külge. Kuna poolide paigutus ei ole rangelt määratud, saab neid paigutada erinevatel viisidel. See annab võimaluse uurida poolide erinevate paigutuste omadusi südametegevuse jälgimisel. Skeemid peavad olema koostatud väikestest nüüdisaegsetest komponentidest, mis kiirendaks kogu süsteemi ehitamist ja kindlustaks selle stabiilsuse. Igal plokil peab olema oma programmeeritav mikrokontroller, mille abiga saaks signaale digitaliseerida ja eeltöödelda sobival viisil. Seade peaks olema kompaktne ja vajama töötamiseks ainult ühendust haldur arvutiga. Viimase kaudu toimuks ka seadme juhtimine ja andmevahetus. Seadme induktsoonmõõtmistega seotud osad ei vaja elektrilist kontakti inimese kehaga, seega on nad patsiendist hästi isoleeritavad ega põhjusta patsiendile elektriohtu, samuti ka mitte nahaärritust või psüühilisi ebamugavusi.

2.5 Töö eesmärk ja sellest tulenevad ülesanded

Meditisiinis on praegu vajalik mugav ja lihtne diagnostiline ja monitooringuvahend, mis võimaldaks jälgida patsientide südame mehaanilist tegevust detailselt, pidevalt ja pikaajaliselt. Ülal käsitletud uuringud selles valdkonnas [3], [4], [5] ja [6] näitavad, et niisugune monitooring on realiseeritav ja saab olla piisaval määral tulemuslik. Foucault' kardiograafia võib rahuldada meditsiini vajadust sellise vahendi järele. Sellest tuleneb **käesoleva töö eesmärk**, mis seisneb selles, et **ehitada saatja-vastuvõtja tüüpi Foucault' kardiograaf südame mehaanilise tegevuse jälgimiseks**.

Eesmärgist tulenevad järgmised ülesanded:

1. ehitada Foucault' kardiograafi juhtgeneraatori süsteem ühe induktoriga, mis tekitab patsiendi kehas pöörisvoolusid indutseeriva magnetvälja;

2. ehitada vastuvõtupoolide ja signaalitöötluse süsteem, milles igas poolis tekkivad võnkumised detekteeritakse ja muundatakse numbriliseks signaaliks;
3. korraldada süsteemis võimalus arvutijuhitavaks juhtgeneraatori sageduse ümberhäälestamiseks;
4. organiseerida andmevahetus andurite ja süsteemi väljundiks oleva arvuti vahel;
5. korraldada hõivatud andmete esmane töötlus, kuvamine haldurarvutil ja salvestamine selle kõvakettale;
6. katsetada ja testida ehitatud süsteemi ning saavutada tema ettenähtud funktsioneerimine.

Loetletud ülesanded on jagatud kahe bakalaureusetöö (autorid Juri Babkin ja Andres Ehrenpreis) vahel. Käesolevas töös tegeldakse ülesannete 2 ja 4-6 lahendamisega.

3. Meetodid ja materjalid

3.1 FouKG vastuvõtuploki vajalikud omadused ja võimalused realiseerimiseks

Bioelektrilise impedantsi mõõtjal peab olema teatud hulk omadusi, mis võimaldaksid seadmel töötada korrektselt ja efektiivselt. Need omadused saavutatakse nüüdisaegse tehnoloogia kasutamisega – analoog- ja digitaalelektronika rakendamisega mõõtesüsteemis.

FouKG saatjaploki ülesandeks on tekitada patsiendi kehas pöörisvoolusid indutseeriv magnetväli. Selle täitmiseks genereerib saatjaplokk kandevsagedusliku võnkumisega signaali (siinussignaali), mida hakkavad moduleerima (muutma) juhtivuse muutused. Viimased on põhjustatud füsioloogilistest muutustest rindkeres, nimelt vere kui elektrolüüdi mahu ja jaotuse muutustest rindkeres südametegevusel. Kandevsignaali sagedus on 4 MHz. See sagedus on lähedal ülemisele piirile, mille juures magnetvälja sissetungivus kudedesse on piisavalt suur, selleks et jälgida kaotakistuse muutusi kogu rindkere ulatuses. Suurema sageduse kasutamisel väheneb nn. pinnaefekti tulemusena magnetvälja tugevus rindkere sügavuses märgatavalt. Kasuliku signaali (rindkere võnkumiste) saamiseks on vaja kandevsageduslikku magnetvälja vastu võtta ja saadud signaali demoduleerida. Viimase juures on omad raskused, ja nende ületamiseks on kasutatud vastavaid skeemilahendusi:

1. Kõrgsagedusliku magnetvälja vastuvõtmine toimub vastuvõtupoolide abil. Et vältida vajadust vastuvõtja häälestamiseks saatja sagedusele, ning ühtlasi vältida mitme lähestikku asuva vastuvõtupooli omavahelisest sidestusest tulenevaid efekte, tuleb kasutada resonantsi häälestamata sisendahelaid (mitte sisendvõnkeringe), mistõttu sisendsignaali jäävad suhteliselt väikseks.
2. Vastuvõtuplokk peaks olema võimeline stabiilselt töötama sõltumata vastuvõtupoolide mõõtmetest ja paigutusest, nõudmata nende mistahes tüüpi varjestamist. Kandevsagedusliku signaali võimendamine vastuvõtuploki võiks tekitada varjestamata ja ettemääramatu geomeetriaga sisendahelate korral parasiitsidestuse tõttu ebastabiilsuse ohtu. Selle vältimiseks suunatakse sisendpoolidest saadav kandevsageduslik signaal otse Gilberti raku põhise detektori diferentsiaalsisendisse, mille väljundis saadavas võimendatud ja demoduleeritud signaalis on kandevsageduslik komponent sedavõrd väike, et ei kujuta ohtu ebastabiilsuse tekkeks.

3. Et saavutada Gilberti raku võimalikult suurt võimendust, kasutatakse tema sümmeetrilise väljundi unipolaarseks teisendamiseks voolupeeglit.
4. Et vähendada Gilberti raku madalsageduslike omamürade ja toitepinge ebastabiilsusest tulevate mürade mõju, kasutatakse seadmes abikandevsagedust ja vastavalt kahekordset sünkroonset detekteerimist: põhikandevsageduse detekteerimine toimub Gilberti rakus, tema väljundist saadava abikandevsageduliku signaali detekteerimine aga toimub juba peale analoog-digitaalmuundamist programselt.

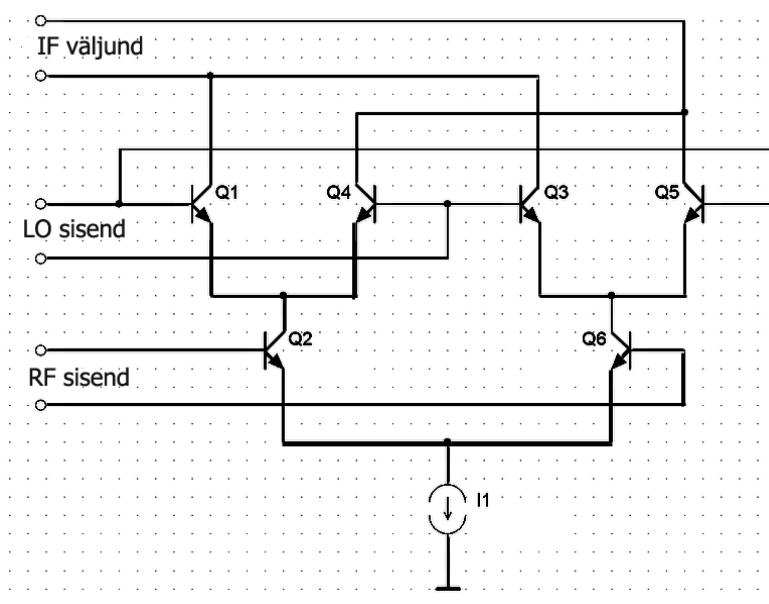
Kirjeldatud põhimõtetele vastavalt on koostatud käesoleva töö raames seadme põhimõtteskeem (vt. Lisa 1).

3.1.1 Signaali detekteerimine

FouKG vastuvõtuplokk, nagu mainitud eelmises peatükis, peab täitma mitu ülesannet. Peamine ja kõige tähtsam ülesanne on registreerida kaotakistuse muutusi rindkeres. Selle lahendamiseks on võetud kasutusele induktiivpool, milles peaks indutseeruma elektromotoorjõud suurusjärgus umbes 1 mV. Kuna ei eksisteeri tehnikat, mille abil saaks detekteerida nii väikest elektromotoorjõudu ilma võimendamata, kasutatakse Gilberti rakke, mis näib täna olevat antud probleemi ainsaks võimalikuks lahenduseks.

Gilberti rakk on 4-kvadrantiline analoogkorruti, mis on kirjeldatud Barrie Gilberti poolt 1968. aastal. Gilberti rakul on palju rakendusi, kuid peamiselt kasutatakse teda signaali sünkroonse modulaatori ja demodulaatorina.

Raku lihtsustatud skeem on toodud joonisel 3. Ta koosneb kahest ühise emitteriga transistorpaarist (Q1/Q4, Q3/Q5), mis töötavad mitteküllastavas voolulülitamise režiimis, ja diferentsiaalvõimendusastmest (transistorpaar Q2/Q6), mille baasidele on juhitud sisendpinge. Q2/Q6 väljundvoolud saavad lülitustransistoride emittervooludeks, sellepärast sõltuvad



Joonis 3. Gilberti raku skeem.

nende astmete väljundvoolud lineaarselt emittervooludest ja vastavatest sisendpingetest.

Käesolevas töös kasutatakse Gilberti rakku signaali detekteerimiseks. RF sisendisse tuleb südametegevuse poolt moduleeritud pinge Foucault' kardiograafi vastuvõtupoolist, LO sisendisse täpselt signaali kandevasagedusega tugipinge (täisnurkne signaal) saatjaploki kandevasageduse generaatorist, kusjuures LO sisendi ühe klemmi pinge on vastasmärgiline (st. 180° nihkes) teise suhtes, ning IF väljundis tekib abikandevasageduslik signaal, mis kujutab endast LO ja RF signaalide korrutist. Nii sisendid kui ka väljundid on diferentsiaalsed. Amplituudmoduleeritud signaali detekteerimisel on LO- ja RF-signaalid sama sagedusega. Sõltuvalt LO-signaali lainekujust võib sellist detektorit kvalifitseerida – sinusoidaalse LO-signaali korral – korrutavaks detektoriks [8] või – täisnurkse LO-signaali korral – sünkroondetektoriks (ingl. k. *lock-in detector*) [9]. Platsid (vt. Lisa 1, PAD1, PAD17 jne) on mõeldud vastuvõtupoolide ühendamiseks.

Iga Gilberti raku väljundis on voolupeegel (vt. Lisa 1, transistorpaarid T1, T2 ja T3), mille ülesandeks on ühtlustada Gilberti raku mõlema IF-väljundi režiimid („kopeerida“ ühe väljundi töövool teisele väljundile) [10]. Pingejagur (vt. Lisa 1, takistid R1 ja R2) määrab algpinge, mille suhtes hakkab signaal tekkima. Kuna Gilberti raku väljundtakistus on kõrge (transistoride kollektorväljundid on kõrge väljundtakistusega), tuleb seda sobitada operatsioonvõimendi abiga. Seepärast on iga Gilberti raku väljundis operatsioonvõimendi (vt. Lisa 1, opvõimendid OP2, OP3 ja OP4). Lisaks on vaja ühist operatsioonvõimendit selleks, et pingejagurit sobitada (vt. Lisa 1, opvõimendi OP1). Tegelikult need võimendid on järgijad, mis teisendavad kõrgeoomilised allikad madalaoomiliseks. Operatsioonvõimendite väljundid on ühendatud mikrokontrolleri analoog-digitaalmuunduri diferentsiaalsisenditega.

3.1.2 Signaalitöötlus

Gilberti rakuga detekteeritud ja võimendatud kasulik signaal on vaja muundada digitaalkoodiks, töödelda programselt ning saata saatjaplokki.

Signaalide analoogkujult digitaalseiks muundamist teostab mikrokontroller, selleks on tal kolm analoog-diferentsiaalsisendit (vt. Lisa 1, mikrokontrolleri viigud A0.0+/A0.0-, A1.0+/A1.0-, A2.0+/A2.0-) ning referentspinge sisend (vt. Lisa 1, VREF liin), mille suhtes hakkab toimuma muundamine. Referentspinge (1,2 V) saab võtta saatjaplokist, kuid saab ka kasutada sisemist referentspinget.

Signaali programsel töötlemisel on vaja eraldada abikandevasageduse positiivne ja negatiivne poolperiood. Selleks vajalik kandevasagedusega *TTL*-signaal (transistor-transistor-loogika pingenivoodega signaal) on võimalik saada otseselt saatjaplokist. Negatiivse poolperioodi korral saadab saatjaplokk loogilist „0“ (0 ... 0,8 V), positiivse poolperioodi korral loogilist „1“ (2,2 ...

5 V). Selle vastuvõtmiseks vastuvõtuplokil on mõeldud A/R_BIT liin, mis ühendatakse mikrokontrolleri sisend-väljundseadmete porti, nimelt *PI.1* (vt. Lisa 1) väljaviigu külge.

Töödeldud kasulik signaal saadetakse saatjaploki kaudu haldurarvutisse mikrokontrolleri *USART* (universaalne sünkroonne/asünkroonne saatja/vastuvõtja) sõlme abil, mis töötab *RS-232* andmevahetusstandardi kohaselt. Saatmine toimub *UART* -liidese abil asünkroonses režiimis.

3.1.3 Andmevahetus

Andmevahetuse ülesandeks on korraldada suhtlus vastuvõtuplokkide ja saatjaploki vahel ning organiseerida *RS-232* andmevahetuskanal haldurarvutiga.

Saatjaploki ja vastuvõtuplokkide vahel on tarvis andmesideliini, mille kaudu hakkab toimuma andmevahetus saatjaploki mikrokontrolleriga. Selline suhtlus toimub ühe kaabli kaudu, mida ühendatakse *USB 3.0* liidese jaoks kasutusel olevate pistiku-pesa paaride abil. Kuna *USB 3.0* liidese pistik (pesa) on 9-kontaktiline ja FouKG süsteemi töötamiseks on vaja kaheksat liini, siis osutub selle standardi kohaste pistikute ja pesade kasutamine otstarbekaks lahenduseks. Andmevahetuskanal haldurarvutiga on korraldatud saatjaploki kaudu, st. vastuvõtuplokk saadab andmeid saatjaplokki, mis omakorda edastab neid haldurarvutile.

Saatjaplokist (skeemil *USB3* pistik) tulevad järgmised signaalid: +5V, maa (GND), tugipinge faas (A/R_BIT), *UART*'i RX ehk vastuvõetav *RS-232* signaal (URX), tugipinge (LO_1 ja LO_2) ja referentspinge (VREF). Saatjaplokki läheb *UART*'i TX ehk saadetav *RS-232* signaal (UTX). Ehitatavas süsteemis peab olema võimalik kasutada mitut FouKG vastuvõtuplokki, seepärast on plaadil ka teine *USB 3.0* pesa (*USB3MIRROR*).

Suhtlemiseks haldurarvutiga on valitud *RS-232* standard, mis kirjeldab füüsilist liidest ja protokollid madala kiirusega jada-andmevahetuseks arvutite ja välisseadmete vahel. Kuna paljudel kaasaegsetel arvutitel ei ole enam *RS-232* ühenduspesa, vaid seda asendab *USB*-ühendus, ühendatakse haldurarvutiga selle *USB*-pordi kaudu ja signaalide teisendamiseks kasutatakse signaalikaablisse lülitatud *USB/RS-232* ostetud valmismuundurit. FouKG-seadme saatja- ja vastuvõtuplokkide *UART* liidesed töötavad *TTL* pingeniivodel, seega muunduri *RS-232* külge peab töötama samadel pingeniivodel.

Muunduriks on valitud *FTDI* firma poolt valmistatud *TTL-232R-PCB* seade, mis ühendatakse arvuti *USB*-pordi külge ning mida juhitakse haldurarvutist virtuaalse *COM*-pordi kaudu vastava draiveri abil. Muundur ise ühendatakse FouKG saatjaploki külge kolme sideliiniga: saatmine (*TX*), vastuvõtmine (*RX*) ja maa (*GND*).

3.1.4 Tulemuste kuvamine

Mõõtetulemusi peab olema võimalik jälgida reaajajarežiimis, selleks on ettenähtud neid kuvada graafikuna halduravuti ekraanil. Vastavalt on vaja koostada programm halduravutile.

3.2 Analooelektroonika funktsionaalsuse simulatsioon

Skeemis olevate komponentide nominaalide valimiseks ja skeemi arendamiseks on vaja simuleerida protsesse, mis hakkavad temas toimuma. Selleks on kasutatud programmi *LT Spice* – firma *Linear Technology* poolt välja töötatud vaba-tarkvara (*SPICE – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*), mis on mõeldud analooelektriahelate töö modelleerimiseks ja testimiseks.

3.3 Elektroonikakomponentide valik

Kuna tegemist on meditsiiniseadmega, siis peaks vastuvõtuplokk olema võimalikult väike, et seda oleks mugav kasutada. Vastuvõtuploki toitepinge on piiratud halduravuti *USB*-pordi poolt 5 voldiga. *USB*-port seab samuti piirid ka komponentide voolutarbele. Need piirangud määravad tingimused analooelektroonika komponentide valimiseks.

On raske leida sobivat integraalskeemi, mis realiseeriks Gilberti rakku, sest tüüpilised olemasolevad lahendused on mõeldud töötamiseks palju suurematel sagedustel, sellepärast tarbivad nad ka rohkem voolu. FouKG saatjaplokist saadava tugipinge sagedus on 4 MHz, mis on piisavalt madal – seega on mõttekam kasutada Gilberti raku realiseerimiseks montaaži diskreetsetest elementidest. Tabelis 1 on esitatud FouKG vastuvõtuplokis kasutatud komponentide valik.

Tabel 1. FouKG vastuvõtuplokis kasutatud elektroonikakomponentide nimekiri

Komponent	Tähis skeemil	Komponendi nimetus	Korpuse tüüp	Kogus
Mikrokontroller	MSP430AFE223	MSP430AFE223	TSSOP	1tk.
Operatsioonvõimendi	OP1, OP2, OP3, OP4	MCP6001	SC-70	4tk.
Pingestabilisaator	TC1017	TC1017	SC-70	1tk.
nnp-transistorpaar	Q3, Q4, Q...	BCM847BS	SC-88	9tk.
Takisti	R7, R8, R...	R-EU_R0402	R0420	19tk.
pnp-transistorpaar	T1, T2, T3	BCM856BV	SC-88	3tk.
Kondensaator	C3, C9, C...	C-EUC0603	C0603	11tk.
Diod	D1	BAS521	SC-79	1tk.

USB 3.0 pesa	USB3,USB3MIRROR	USB 3.0 A-tüüpi pesa	2tk.
--------------	-----------------	----------------------	------

3.4 Mikrokontroller ja selle omadused

Mikrokontroller peab täitma mitu ülesannet: edukalt detekteerima kolm võimendatud signaali Gilberti rakkudest, muundama nendest signaalidest saadud väärtused digitaalkoodiks, töötleva vajalikul viisil ning saatma saatjaploki kaudu haldurarvutisse.

Mikrokontrolleriks on valitud *MSP430AFE223* seade *MSP430*TM seeriast, mida pakub firma *Texas Instruments*. Antud valik seletub ülesannetega, mida peab täitma vastuvõtuplokk. Kontrolleril on palju erinevaid omadusi, aga käesoleva töö jaoks tulevad kasuks järgmised: väike voolutarve (toitepinge 1,8 – 3,6V), 16-bitine *RISC*-arhitektuur, kolm iseseisvat analoog-digaalmuundurit suure lahutusvõimega (kuni 24 bitti), mis baseeruvad teist järku ülediskreetimisega sigma-delta modulaatoril ja digitaalfiltril, ning universaalne sünkroonne/asünkroonne jadaliides (*USART*).

3.5 Tarkvaraarendus

3.5.1 Mikrokontrolleri programmeerimine

Mikrokontrolleri programmeerimiseks kasutatakse spetsiaalset programmeerimiskeskonda (*IAR Embedded Workbench for TI MSP430*) *MSP430* mikrokontrollerite seeria jaoks. See on integreeritud arenduskeskkond ja optimeeriv *C/C++* kompilaator, mis võimaldab kirjutada programme ka assemblerkeeles. Kuna mikrokontrolleriga täidetav ülesannete hulk ei ole mahukas ega raske, kasutatakse just assemblerkeelt.

3.5.2 Programmaator

Mikrokontrolleri programmeerimiseks ei piisa ainult arvutist arendamiskeskonnaga (arendusarvutist), on veel vaja vahepealset seadet, mis võimaldaks kirjutada andmeid (koodi) mikrokontrollerisse, lugeda sealt või siluda kirjutatavat programmi. Seda funktsiooni teostab programmaator/siluja.

Programmaatoriks on valitud firma *Texas Instruments* poolt valmistatud seade (*MSP-FET430-UIF*), mis sisaldab *USB* silumisliidest mikrokontrolleri programmeerimiseks ja silumiseks reaaja režiimis. Seade ühendatakse arendusarvuti *USB*-porti. Sealt võetakse arenduse alal nii juhtsignaalid kui ka mikrokontrolleri toitepinge ning programmeerimispinge. Need signaalid lähevad vastuvõtuplaadi *JTAG*-pesa (vt. Lisa 1, *JTAG PORT*) kontaktaukudesse (vt. Lisa 1,

JTAG-pesa viigud: VCC, VSS, TEST/SWBWTCK, RSI/NMI/SBWTDIO). Andmevahetus toimub järjestikuse *JTAG*-protokolli abli, mille nimeks on *Spy-Bi-Wire*.

3.5.3 Testimistarkvara arvutile

Selleks, et kontrollida, kuidas mikrokontroller täidab oma ülesandeid, on tarvis testimisprogrammi. FouKG vastuvõtuplokk hakkab mõõdetud tulemusi saatma saatjaploki kaudu arvutisse ülalkirjeldatud liidese kaudu. Testimisprogramm peab olema sobivalt seadistatud, et andmeid virtuaalsest *COM*-pordist korrektselt ja õigeaegselt kätte saada.

Programmeerimiskeeleks on valitud *LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)* – visuaalprogrammeerimise keel, mis on väljatöötatud firma National Instruments. Ta võimaldab lihtsal viisil organiseerida suhtlust riistvara ja arvuti vahel ning töödelda ja kuvada andmeid arvuti ekraanil.

3.6 Trasseerimistarkvara

Nii elektroonikaskeemi kui ka motaažiskeemi joonistamiseks on kasutatud firma *CadSoft* poolt valmistatud programmi *EAGLE (EAGLE – Easily Applicable Graphical Layout Editor) Light Edition* õppeotstarbelist vabavara. Programmil on suur hulk biblioteeke erinevate komponentidega (juba valmisolevate skeemi- ja *PCB*-kujutistega), aga on ka võimalus uusi komponente või biblioteeke iseseisvalt lisada. Selle programmiga joonistatud *PCB*-skeem on toodud joonisel 4.

4. Tehtud töö kirjeldus

4.1 Montaažiplaadi valmistamine

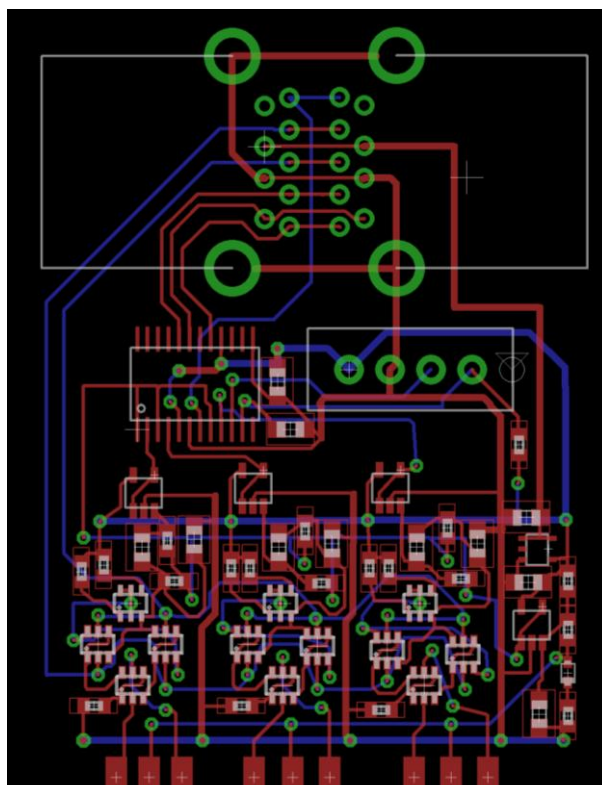
4.1.1 Trasseerimine

Selleks, et paigaldada montaažiplaadile elektroonikakomponendid ja nende vahelised elektrilised ühendused, on tarvis valmistada trükkplaat. Esiteks on vaja trasseerida *PCB* (*PCB – Printed Circuit Board*) ülalkirjeldatud tarkvaraga. Sellel juures on vaja jälgida, et jooteplatsid või komponentide vahelised trassid ei oleks liiga lähestikku, sest see võib tekitada probleeme nii montaažiplaadi valmistamisel kui ka jootmisel. Samuti on oluline jälgida, et komponentide vahelised ühendused ehk trassid ei ristuks, kui ühendusskeem ei näita teisiti. Trasside ristumise vältimiseks viiakse neid tihti ühendusavade kaudu plaadi teisele poolele.

Viis uut komponenti oli tarvis käesoleva töö käigus luua. Uue komponendi loomisel on tarvis joonistada tema kujutised skeemielemendina ja montaažielemendina ning määrata vastavusseosed nende vahel. Samuti on oluline jälgida komponentide mõõtmeid, et õigesti joonistada platse ühenduste jaoks. Mõõtmeid ja kujutisi võetakse vastava komponendi andmelehest.

4.1.2 Jootmine

Trükkplaat valmistati selliste töödega tegelevas firmas *Brandner* meie poolt ette antud *PCB*-trasseeringu järgi. Komponentid jootsime plaadile käsitsi kasutades pastajootmise tehnikat. Kogu protsess näeb välja selliselt: ühendusplatsidele kantakse tinapasta, seejärel paigutatakse elektroonikakomponendid pastaga kaetud platsidele, kusjuures jälgitakse, et pasta oleks täpselt platsi peal ja ei satuks platside vahele, ning iga komponendi ühendusjalad oleksid täpselt platsidel. Paigutamisel on vaja jälgida



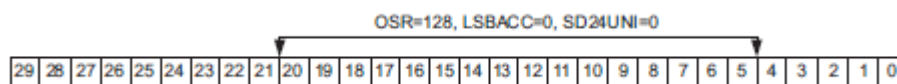
Joonis 4. *PCB*-trasseering: punasega on määratud komponentide paigutamispatsid ja nende vahelised ühendused, sinised liinid kujutavad trasse plaadi vastaspoolel, rohelisega on näidatud kontaktaugud.

komponentide nominaale ja polaarsust. Kuna komponendid on väikesed, on tarvis kasutada mikroskoopi ja pintsetti. Kui 4 – 5 elektroonikakomponenti on paigas, pannakse montaažiplaati ahju. Esialgu tuleb plaati kuumutada 140 °C juures, siis tõsta temperatuuri 180 ... 200 °C-ni. Kui pasta on sulanud, võib plaadi ahjust välja võtta ja kontrollida mikroskoobi all, kas komponendid on õigesti külge joodetud. Seda protsessi korratakse, kuni kõik komponendid on plaadile joodetud.

4.2 Mikrokontrolleri tarkvara kirjutamine

Mikrokontrolleri ülesandeks on muundada analoogsignaali A/D muunduri ühest kanalist digitaalkujule, teostada nendega vajalikud aritmeetikatehted ning saata tulemused haldurarvutisse. Ülesannete täitmiseks kirjutati assemblerkeelne programm arenduskeskkonnas *IAR*. Programmi lähtekood on esitatud Lisas 2. Programmi üldine plokk-skeem on toodud joonisel 6.

Analoog-digitaalmuundamine toimub mikrokontrolleri sisseehitatud sigma-delta-tüüpi analoog-digitaalmuunduriga (ühega kolmest võimalikust). Selleks, et kasutada muundamise funktsioone programmis, on tarvis vastava mooduli (vt. andmelehte [11], peatükk nimega *SD24_A*) initsialiseerida ehk seadistada selle kontrollregistrid. Antud ülesande jaoks on valitud järgmised seadistused: taktikella allikaks on valitud *MCLK* (*MCLK* – *Master CLocK*) kell sagedusega 8 MHz; taktisagedus jagatakse 8-ga; referentspinge allikaks on valitud sisseehitatud referentspinge allikas (1,2 V); kolmas muundamise tulemus (ja järgnevad) tekitab katkestusi, millega teatab, et lugemi tulemus on kehtiv (pärast muundamise alustamist on vaja muundurile aega stabiliseerumiseks); ülediskreetimistegur (*OSR* – *Oversampling Ratio*) on 128, mis tähendab, et üks tulemus saadakse 128 μ s kohta, ning koos bittidega *LSBACC* ja *SD24UNI* määrab, mis bittide vahemikus saadakse iga muundamise tulemus (vt. joonis 5); muundamise tulemused hoitakse täiendkoodis (*two's complement*). Muunduri initsialiseerimine toimub protseduuris nimega „SetupSD24“ (vt. Lisa 2).

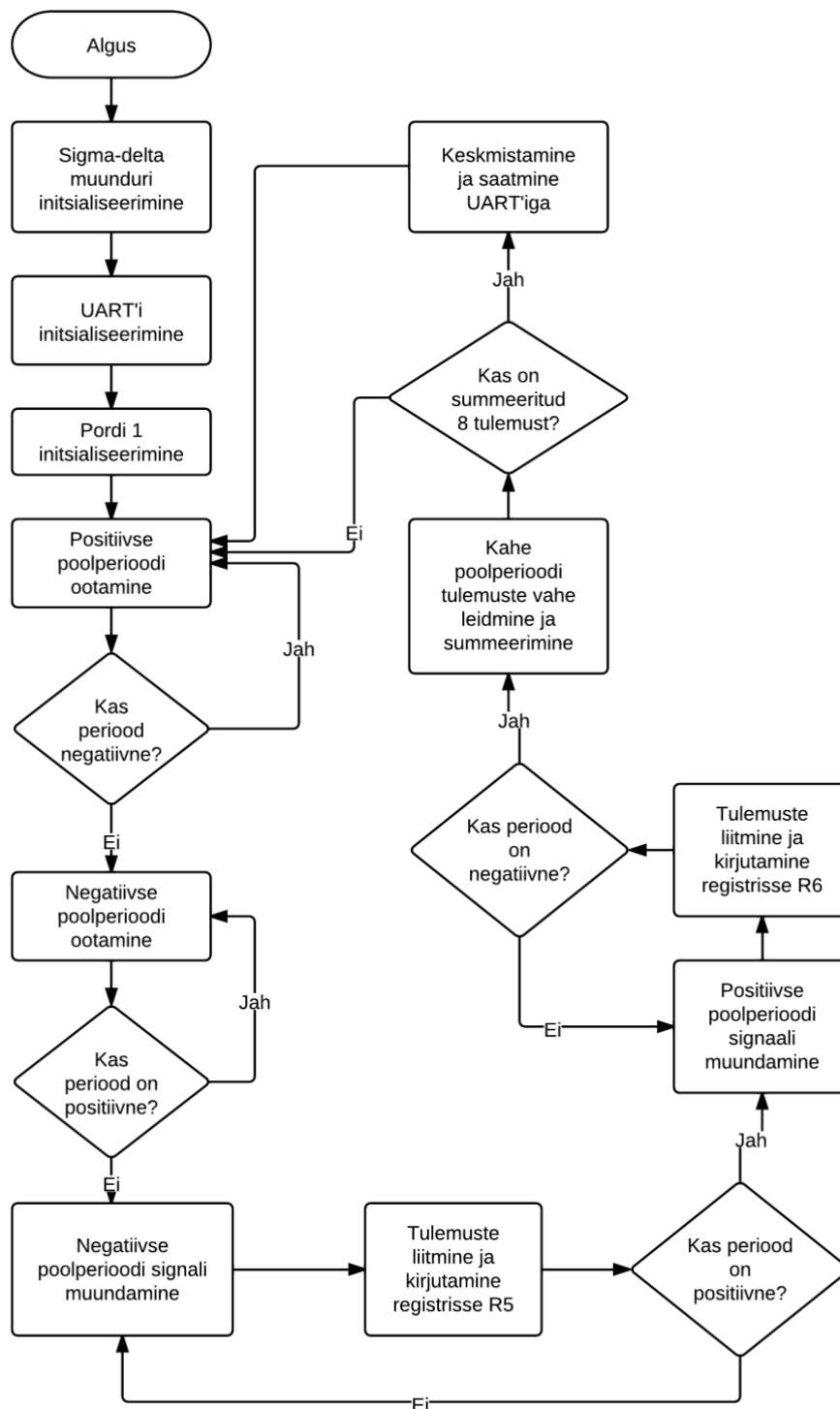


Joonis 5. Bittide vahemik muundamise tulemuseks [11].

Andmevahetuseks arvutiga on vaja initsialiseerida mikrokontrolleri *USART* moodul, mis hakkab töötama UART režiimis. Selleks on vaja viia ta *reset*-olekusse, siis teha vajalikud seadistused temale ning seejärel tühistada *reset*-olek. Suhtlus hakkab toimuma kiirusega 115200 bitti

sekundis, 8-bitise andmepaketiga, ühe stop-bitiga ja ilma paarsuseta. *USART*’i initialiseerimine toimub protseduuris „SetupUSART“ (vt. Lisa 2).

Andmevahetuseks välisseadmetega (saatjaploki mikrokontrolleriga ja haldur arvutiga) on oluline ka konfiguratsioon sisend-väljundseadmete port ja määrata *UART*’i saatmise ja vastuvõtmise väljaviigud ning „A/R_BIT“ sisendbiti väljaviik. Selline konfiguratsioon on tehtud protseduuris „SetupPort1“ (vt. Lisa 2).



Joonis 6. Mikrokontrolleri tarkvara plokk-skeem.

Muundamise tulemustega on vaja teha aritmeetikatehteid, nimelt summeerida mõõdetud väärtused kande-signaali positiivse poolperioodi ja negatiivse poolperioodi jooksul, leida nende vahe ning rakendada keskmistamisfunktsiooni, mis hakkab keskmistama kaheksa täisperioodi jooksul leitud vahesid. Keskmistamist on tarvis selleks, et maha suruda signaalimürad. Programm töötab katkestusi kasutamata ja muundamist alustatakse negatiivse faasist ehk poolperioodi algusest, mis on väga oluline programmi korrektseks tööks.

Keskmistatud väärtusi saadetakse arvutisse ühebaidilistena (noorema baidina – *LSB* – *Least Significant Byte*), kuigi vastavad kontrolleri arvud on kahebaidised. Selle põhjuseks on asjaolu, et arvuti, kui ta saab kaht baiti kätte, ei suuda määrata, millise – noorema (*LSB*) või vanema (*MSB* – *Most Significant Byte*) baidiga on tegemist, kuna nende järjekord ei ole määratud. Probleem on täiesti lahendatav spetsiaalse suhtlusprotokolli loomisega. Testimiseks ja esialgseks uurimiseks aga piisab *LSB*-st.

4.2.1 Programmi silumine ja testimine

Programm siluti ja testiti *IAR* arenduskeskkonnas, selleks on *IAR*-l olemas vastav funktsionaalsus. Programmi saab ridade kaupa täita ning vaadata, millises seisus on olekuregistrite bitid või millised väärtused kirjutatakse registritesse. Silumiseks on kaks režiimi: simulatsioon, mille juures riistvaralised protsessid on simuleeritud arenduskeskkonna poolt, ja režiim programmaatori/siluja kasutamisega. Viimase korral toimuvad riistvaras reaalsed protsessid ja neid saab jälgida.

Testimisel jälgiti programmi üldist käitumist ja hinnati saadud tulemuste vastavust kavandatule.

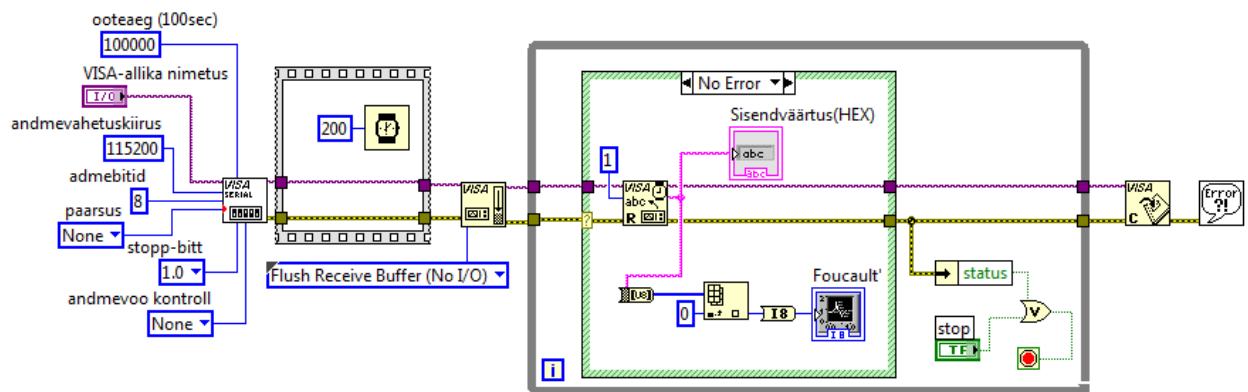
4.3 Haldur arvuti tarkvara kirjutamine

Mikrokontrolleriga saadetavaid tulemusi on vaja piltlikult esitada arvuti abil. Selleks on kirjutatud rakendusprogramm *LabVIEW* arenduskeskkonnas. Programm koosneb kolmest põhilisest osast: jadapordi seadistamine ja ühendussessiooni algatamine; vastuvõtutsüklitel, milles toimub pordist andmete lugemine ja kuvamine graafikule; ühendussessiooni lõpetamine. Suhtlemiseks jadaliidesega on kasutatud funktsioonid *NI-VISA* tarkvarast, mis sisaldab vajalikke draivereid ja biblioteeke.

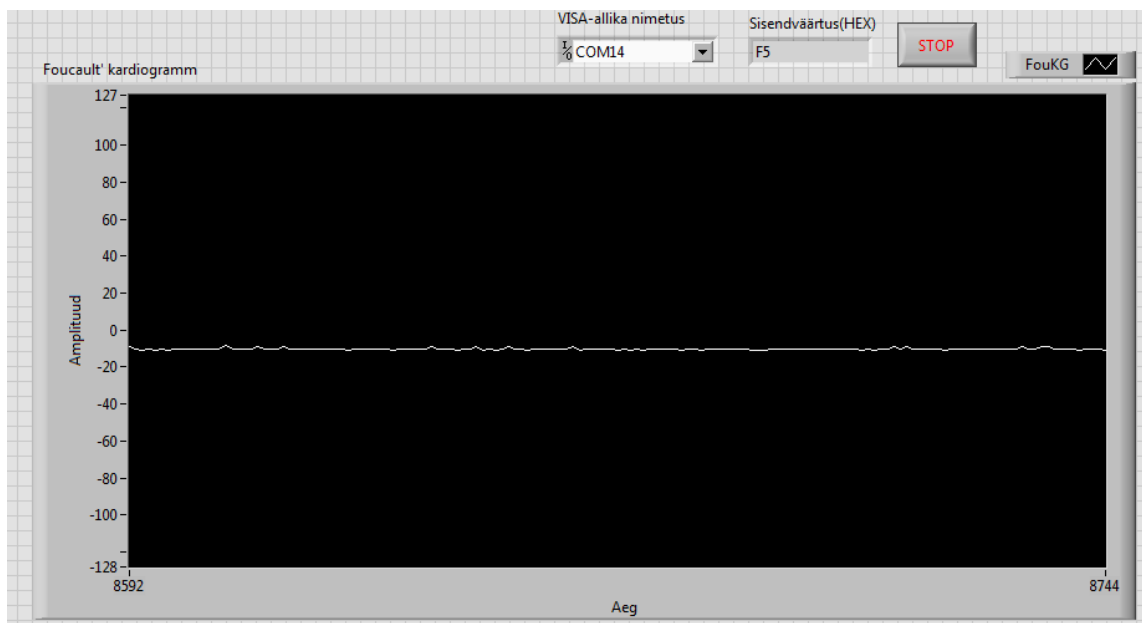
Pordi seadistamine toimub vastavalt mikrokontrolleri *UART*-i konfiguratsioonile: andmevahetuskirgus on 115200 bit/s; stopp-bitt on üks; andmepakett on 8-bitine ja paarsuskontrolli ei ole. Pärast pordi seadistamist järgneb 200 ms viivitust ja vastuvõtupuhvri tühjendamine, mille eesmärgiks on anda aega pordi seadistamiseks ja vabastada puhver varem saadud andmetest.

Vastuvõtutsükli toimub pordist saadud 8-bitilise andmesõna (täiendkoodis) muundamine kümnendarvudeks (märgiga), mida seejärel kuvatakse graafikul. Selleks, et kontrollida, kas saadud väärtus on kooskõlas mikrokontrolleri poolt saadetuga, on tsükli olemas indikaator, mis näitab sisenenud väärtust kuueteistkümnendsüsteemis (*IAR* arenduskeskkonnas registre trite sisu on samuti *HEX*-koodis). Kui programmi täitmisel tekib viga või kasutaja vajutab „STOP“ nuppu, siis ühendussessioon lõpetatakse ja esitatakse veateade (kui see on tekkinud). Programmi ülesehituse skeem on näidatud joonisel 7.

Programmi kasutajaliides (vt. joonis 8) kuvab graafiku, mille horisontaalteljel on aeg ja vertikaalteljel signaali amplituud. Samas on aken *VISA*-allika ehk jadapordi valimiseks, sisendväärtuse indikaator ja STOPP-nupp. Kuna saadavad andmed on 8-bitised ja täiendkoodis, siis kümnendsüsteemis esitatuna võib signaali amplituud olla vahemikus -128 kuni 127.



Joonis 7. Testimisprogrammi ülesehitus *LabVIEW* arenduskeskkonnas.

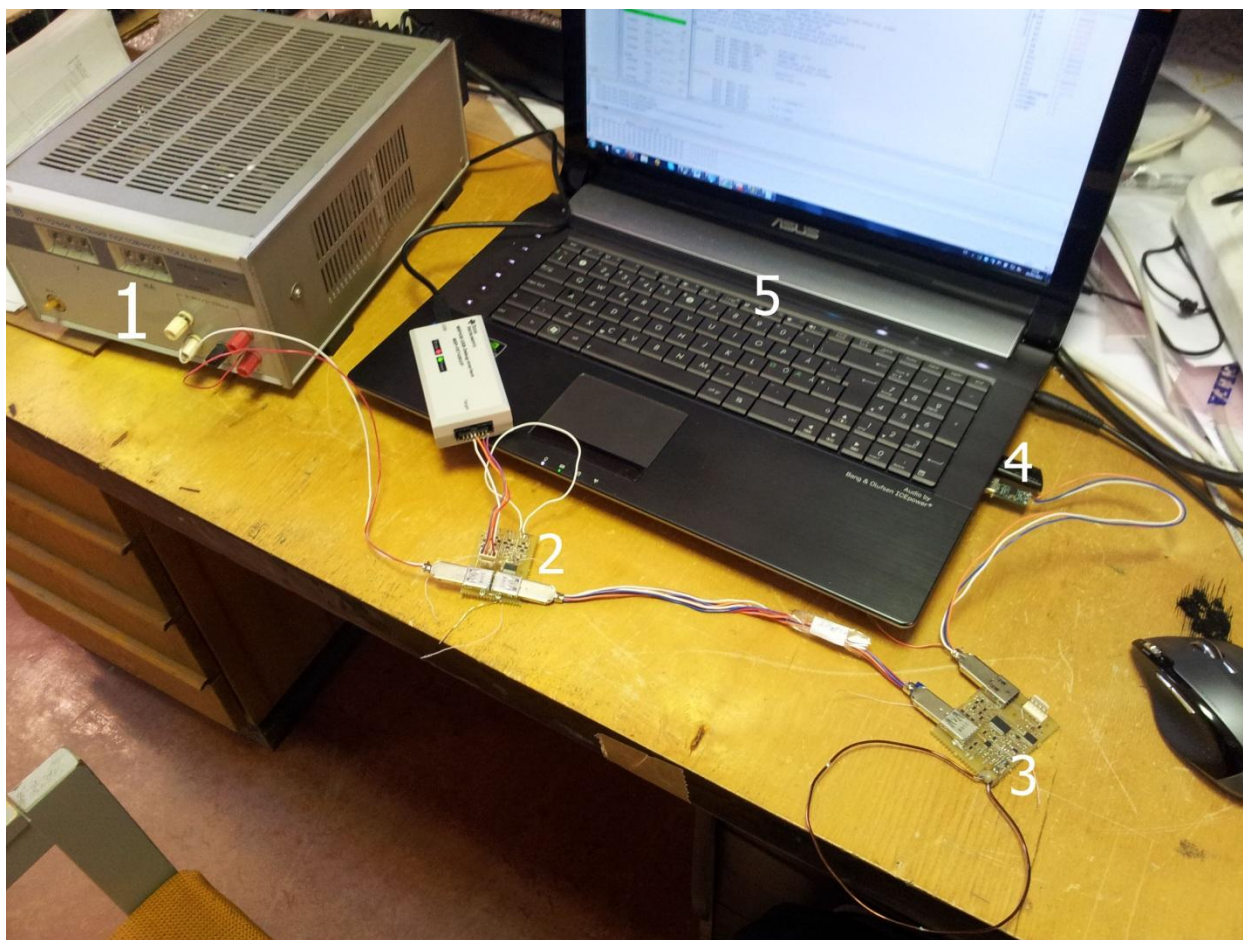


Joonis 8. Testimisprogrammi kasutajaliides (*LabVIEW*).

5. Tulemused ja arutelu

5.1 Katsetamiseks vajalikud seadmed

Valmishitatud FouKG vastuvõtuploki katsetamiseks ja tulemuste uurimiseks oli tarvis kasutada mitut lisaseadet. Nende hulgas oli laboratoorne toiteallikas, saatjaplokk ja arvuti. Laboratoorse toiteallika kasutamine ei ole kohustuslik, kuna FouKG süsteemi toitmine on mõeldud arvuti USB-pordist, vaid on testimisel soovitatav, sest ta võimaldab kaitsta süsteemi liigvoolu ja ülepinge eest ning juhuslike kontaktide lühiste vastu. Toiteallikas ühendatakse vastuvõtuploki külge. Andmevahetus saatjaploki ja vastuvõtuploki vahel on korraldatud 9-juhtmelise ühendusega. Haldur arvuti, millel on käivitatud testimistarkvara, ühendatakse saatjaploki külge 3-traadilise ühendusega kasutades *TTL-232R-PCB* muundurit. Foto katsetamiseks vajalikkude seadmetega on toodud joonisel 9.



Joonis 9. Katsetamiseks vajalikud seadmed ja nende ühendused. 1 - laboratoorne toiteallikas, 2 - vastuvõtuplokk, 3- saatjaplokk, 4 - *TTL-232R-PCB* muundur, 5 - haldur arvuti.

5.2 Katsetamine

5.2.1 Eesmärk

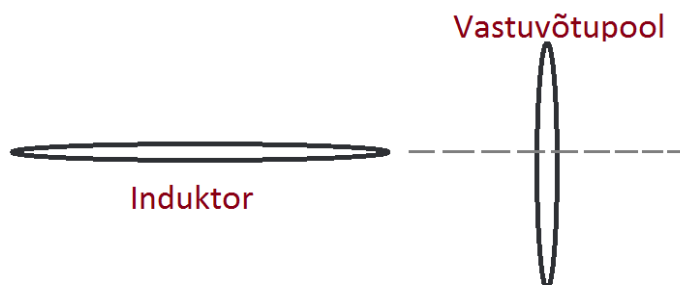
Katsetamise eesmärgiks oli veenduda, et vastuvõtuploki analoogosa ja mikrokontroller täidavad oma ülesandeid, nimelt et FouKG signaal korrektselt detekteeritakse (demoduleeritakse), digitaliseeritakse, ja töödeldud kujul saabub arvutisse, kus toimub lihtne järeltöötlus ja kuvamine graafikuna.

5.2.2 Saadetava signaali omadused

1. *LT Spice* mudelist määrati Gilberti raku ligikaudne võimendus selleks, et hinnata kui suurte signaalidega on tegemist mikrokontrolleri A/D muunduri sisendites. Kui Gilberti raku sisendisse tuleb pinge 1 mV amplituudiga, siis Gilberti raku väljundis tekib pinge amplituudiga 180 mV, seega võimendustegur on 180. Selline võimendus on ootamatult suur, kuid ta näitab, et kasutatud skeemilahendus (Gilberti rakk ja tema väljundis olev voolupeegel) on efektiivne madalate sageduste detekteerimisel.
2. A/D muunduri sisemist võimendustegurit võib pidada üheks, ta määrab muunduri mõõteulatuse voltides (miinimust maksimumini). Kuna referentspinge on 1,2 V, siis maksimaalne mõõdetav pinge on +0,6 V (HEX-koodis 0x7FFF) ja minimaalne -0,6 V (HEX-koodis 0x8000). Iga muundamise tulemus on 21-bitine, millest kasutatakse vanemaid 16 bitti (määratud ülediskreetimisteguriga). Operatsioonid bittidega (tulemuste summeerimine ja nihutamine) ja A/D muunduri resolutsioon määravad teisenduse mastaabi, mille arvutatud suurus on 1digit/59 μ V. See tähendab, kui Gilberti rakuga võimendatud signaal muutub 59 μ V võrra, siis temale vastav digitaalne signaal muutub ühe kümnendühiku võrra. Ülekande mastaap Gilberti raku sisendist on omakorda 180 korda suurem – ligikaudu 1digit/0,33 μ V.
3. Saadetav signaal on müradega. Gilberti raku väljundis nähtavad mürad, taandatuna sisendisse, on suurusjärgus 1 μ V, mis on rahuldav tulemus. Need mürad on nähtavasti pärit analoog-digitaalmuundist. Mikrokontrolleri andmelehest [12] ei selgu otseselt lubatud mürade suurus. Nullinihe (*Offset error*) on kuni 0,2% [12] täisskaalast, mis moodustaks 2,4 mV, aga see ei ole mürade suurus, kuna järjest tulevad lugemid on sama nihkega. *CMRR* (*Common-mode rejection ratio*) on vähemalt 90 dB [12], seega nt. 100 μ V suuruse häire tekitamiseks analoog-digitaalmuundi sisendis peaks väliskeskkonna päritoluga sünfaasiline müra olema ligikaudu 3 V, mis on ebareaalne. Mida tuleks mikrokontrolleri režiimis muuta, et analoog-digitaalmuunduri mürad saaksid oluliselt väiksemad, vajaks edasist uurimist.

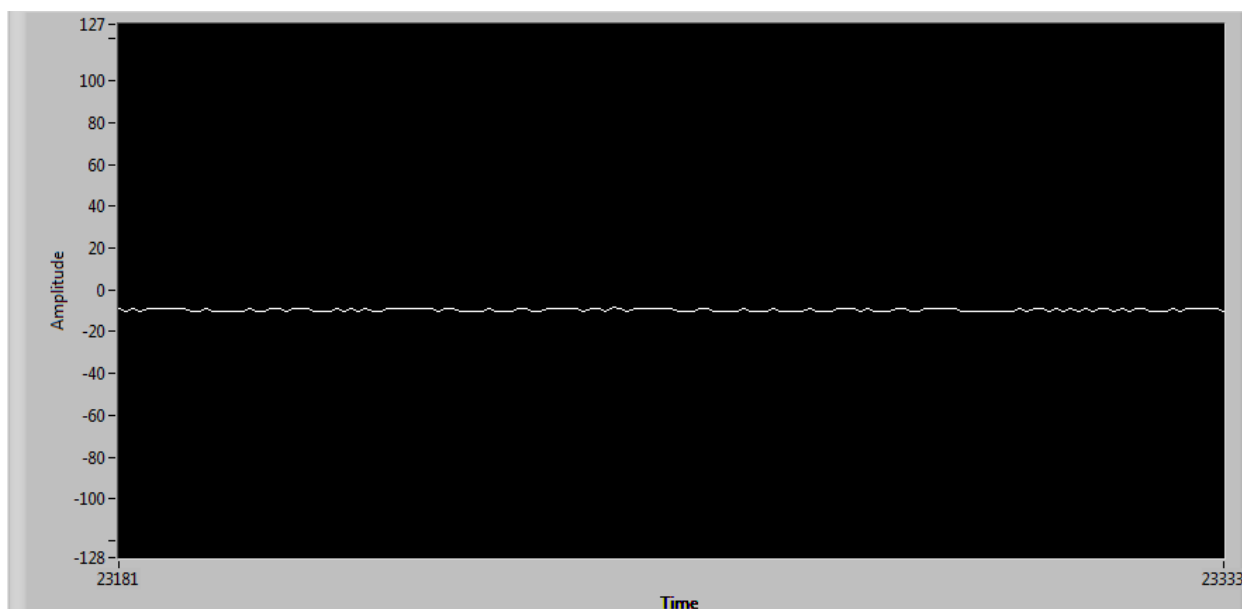
5.2.3 Tulemused

Katsete käigus uuriti, kuidas mõjub saadavale signaalile vastuvõtupooli asend induktoripooli suhtes ja mis juhtub signaaliga, kui poolide vahele paigutatakse mingi objekt. Nelja katse tulemused on kirjeldatud ja analüüsitud alljärgnevalt.



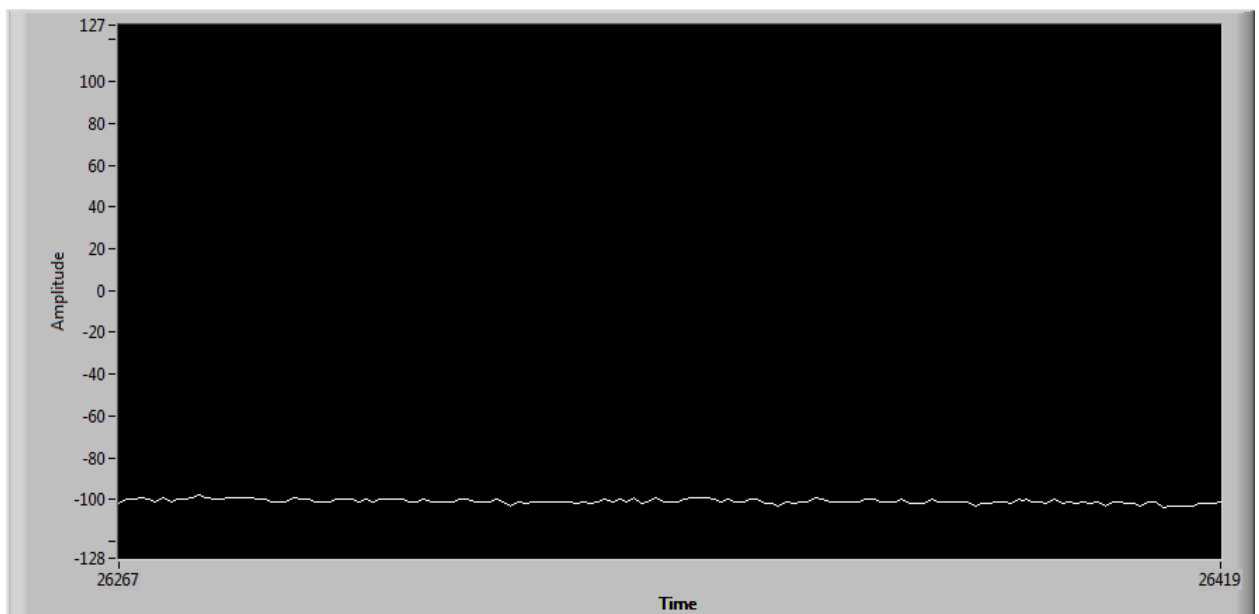
Joonis 10. Poolide paigutus esimesel katsel.

Induktor ja vastuvõtupool olid valmistatud vasktraatidest läbimõõtudega 1,2 mm ja 0,7 mm. Esimese katse korral paiknesid induktor (läbimõõduga 11 cm) ja vastuvõtupool (läbimõõduga 6,5 cm) ristuvates tasandites (vastuvõtupooli tsenter oli induktori lingu tasandis, kuusjuures tema lingu tasand oli vastuvõtupooli tasandiga risti, vt. joonis 10) ja nende tsentrite vahekaugus oli 25 – 30 cm. Poolide vahel objekte ei olnud (keskkonnaks oli õhk). Saadud signaali kõver on näidatud joonisel 11.



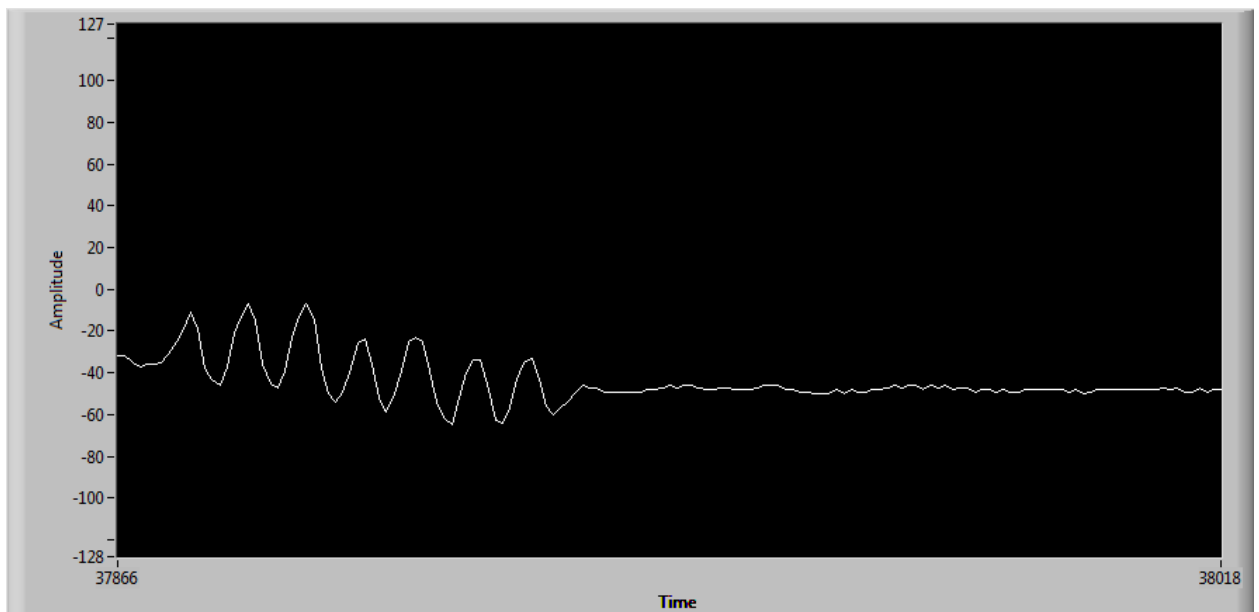
Joonis 11. FouKG signaal, kui poolid on ristuvates tasandites kaugusel 25 – 30 cm.

Järgmise katse korral pöörati vastuvõtupool 90 kraadi võrra niiviisi, et mõlemad poolid jäid samale vahekaugusele, kuid olid juba ühes ja samas tasandis (joonisel 10 on see tasand näidatud halli punktiiriga). Selle katse signaali kujutab joonis 12, millest on võimalik näha, et signaali nivoo muutus võrreldes esimese katsega. Selles katses pöörati vastuvõtupool ka 90 kraadi võrra vastassuunas, mis andis tulemusena sarnase sirge, kuid hälbe väärtused olid +90 ... +95 ühiku piirides, mis oli täiesti ootuspärane – vastuvõtupoolis indutseeruva voolu polaarsus muutus vastupidiseks. Kuna graafik näitab kasulikku ehk demoduleeritud signaali, siis uuritava objekti konstantse takistuse korral peab signaal olema samuti konstantne. Joonisel 11 ja 12 signaalikõverad näitavad, et signaal on peaaegu konstantne ja amplituudi väärtus muutub 1 – 3 ühiku võrra. Selline muutumine on põhjustatud mürade poolt.



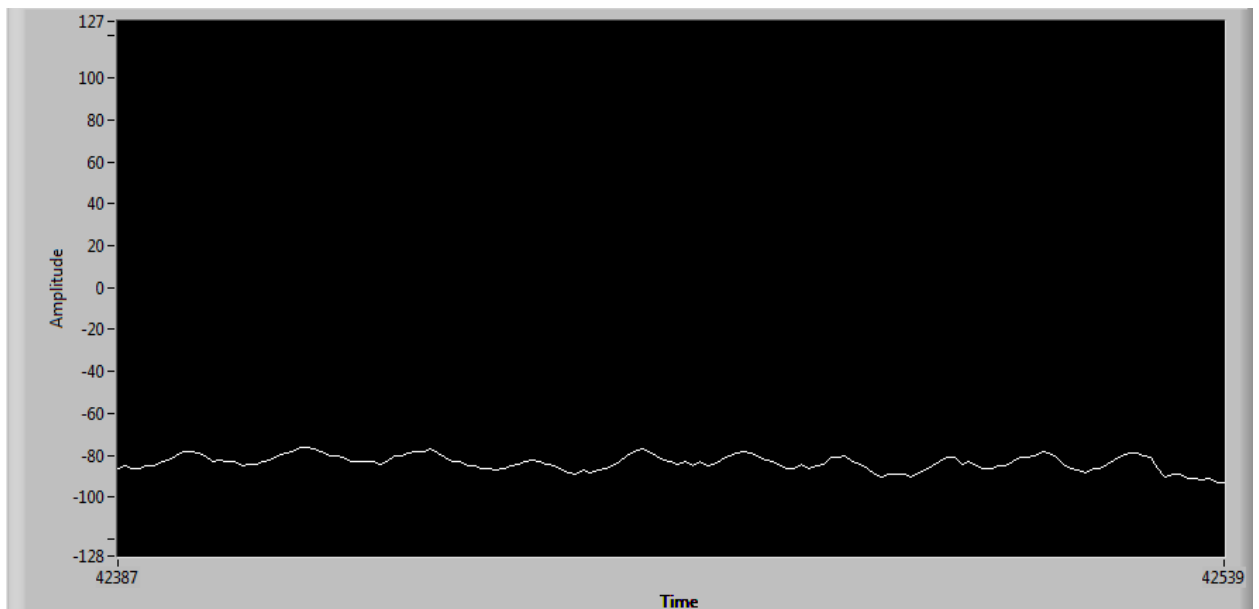
Joonis 12. FouKG signaal, kui poolid on samas tasandis kaugusel 25 – 30 cm.

Kolmandas katses võngutati esialgu vastuvõtupooli 2 – 3 cm võrra induktiivpooli suhtes, seejärel hoiti konstantsel kaugusel (10 – 15 cm). Tulemusena saadud signaal, mis on toodud joonisel 13, demonstreerib, et vastuvõtt on piisavalt tundlik ja kajastab vastuvõtupooli asendi muutusi.



Joonis 13. FouKG kasulik signaal, vastuvõtupooli liigutamine induktori suhtes ja hoidmine konstantsel kaugusel (10 – 15 cm).

Viimane katse on esitatud joonisel 14, mis näitab signaali käitumist, kui poolide vahele (vahekaugus 20 cm) asetati käsi üheks sekundiks ja seejärel eemaldati sealt. Graafikult on hästi näha, et niisugust protseduuri korralditi kümme korda, kuna kõver perioodiliselt tõuseb ja langeb.



Joonis 14. FouKG signaal käe liigutamisel poolide vahele ja eemaldamisel sealt.

5.2.4 Järeldused

Katsetamise käigus on saadud positiivsed tulemused, mis näitavad, et vastuvõtuplokk töötab nagu kavandati – moduleeritud FouKG signaal on edukalt detekteeritud, digitaliseeritud ning saadetud testimisprogrammile, mis näitab arvuti ekraanil ajas muutuvat graafikut. FouKG vastuvõtuplokk on väga tundlik – reageerib vastuvõtupoolis tekitavatele pingemuutustele suurusjärgus $0,33 \mu\text{V}$, registreerib poolide asendi muutmist üksteise suhtes ja nende vahekauguse muutumist. Saadavas kasulikus signaalis on siiski märgatav müra. Neljanda katse (joonis 14) tulemuste põhjal võib järeldada, et seade reageerib inimkeha osa sattumisele anduri tajupiirkonda.

5.3 Arutelu

Vaatamata sellele, et antud töö raames ehitatud Foucault' kardiograafi vastuvõtuplokk andis katsetamisel positiivse tulemuse, ei ole lõplik eesmärk saavutatud – enne usaldusväärse Foucault' kardiogrammi saamist vajab seade edasist arendamist, katsetamist ning uurimist inimese peal. Käesolevas töös kasutati FouKG signaali detekteerimiseks ainult üht vastuvõtupooli kolmest võimalikust. Kolme vastuvõtupooli kasutamiseks on vaja täiendada nii mikrokontrolleri programmi kui ka programmi testimisarvutile, luua andmevahetusprotokoll, mis määrab kuidas on tarvis saata töödeldud mõõtetulemusi kolmest A/D muundurist RS-232 liidese kaudu, kusjuures oleks otstarbekas kasutada kahebaidilist andmesõna ühebaidise asemel. Tulevikus tekib tõenäoliselt vajadus mitme vastuvõtuploki kasutamiseks ning vajadus FouKG signaali matemaatiliseks töötluseks, mille eesmärgiks on eraldada teineteisest signaali hingamis- ja südamegevusest tingitud komponendid.

SAATJA-VASTUVÕTJA TÜÜPI FOUCAULT' KARDIOGRAAFI VASTUVÕTUPLOKI EHTAMINE

Juri Babkin

Kokkuvõte

Katsetes saadud tulemuste põhjal võib konstateerida, et käesoleva töö käigus ehitatud Foucault' kardiograafi vastuvõtuplokk vastab ülesande püstituses esitatud eesmärkidele.

Haldurarvutisse saadetakse numbriline signaal, mis esitab detekteeritud FouKG kasulikku signaali, reageerib vastuvõtupooli ja induktori asendi muutusele, kusjuures signaalile mõjub ka Foucault' kardiograafi saatjaplokiga tekitava magnetvälja jõujoonte suund ehk polaarsus. Katses selgitati välja, et bioobjekti liikumise jälgimine seadmega on täiesti võimalik.

Foucault' kardiograafia meetodi kõige tähtsam eesmärk on ikkagi südame mehaanilise tegevuse jälgimine. Käesolevas töös ei olnud selline eesmärk püstitatud, kuid ülal kirjeldatud ja valminud seade annab baasi edaspidiseks arendamiseks, uurimiseks ja katsetamiseks. Edaspidi tekib tõenäoliselt vajadus uuringuteks inimestel ja kui selgub, et selline meetod on edukas, toob ta loodetavasti suurt kasu meditsiinile ja arstidele, kes tegelevad südamehaigete uurimise ja ravimisega.

DESIGN OF THE DETECTOR BLOCK FOR THE TRANSMITTER-RECEIVER TYPE FOUCAULT CARDIOGRAPH

Juri Babkin

Summary

Foucault cardiography is a method (the corresponding device being named as Foucault cardiograph) for tracking the mechanical activity of the heart, based on the using of eddy currents (i.e. Foucault currents) for the probing of the heart.

The goal of this Bachelor's thesis was to build the detector block for the transmitter-receiver type Foucault cardiograph having 3 receiving coils. The idea of this device belongs to Leo-Henn Humal. In order to achieve the set goal, it was necessary to solve the following problems: to build a system with three receiving coils and a local digital signal processing unit, in which the electric oscillations from the receiver coils would be detected and converted into digital form; to organize pre-processing of the digitized data by a local micro controller; to arrange transfer of the data to a master computer, where the results of the measurements would be represented graphically; to test and study the built system.

As the results of testing, it can be stated that the Foucault cardiograph's receiver block built during the present work meets the requirements which have been listed above. The digital signal being received by the master computer responds to motion of the receiving coil relative the transmitter coil; it also responds properly to the change of polarity of the transmitter's field. It is ascertained, that the built device enables observing the motion of biological objects.

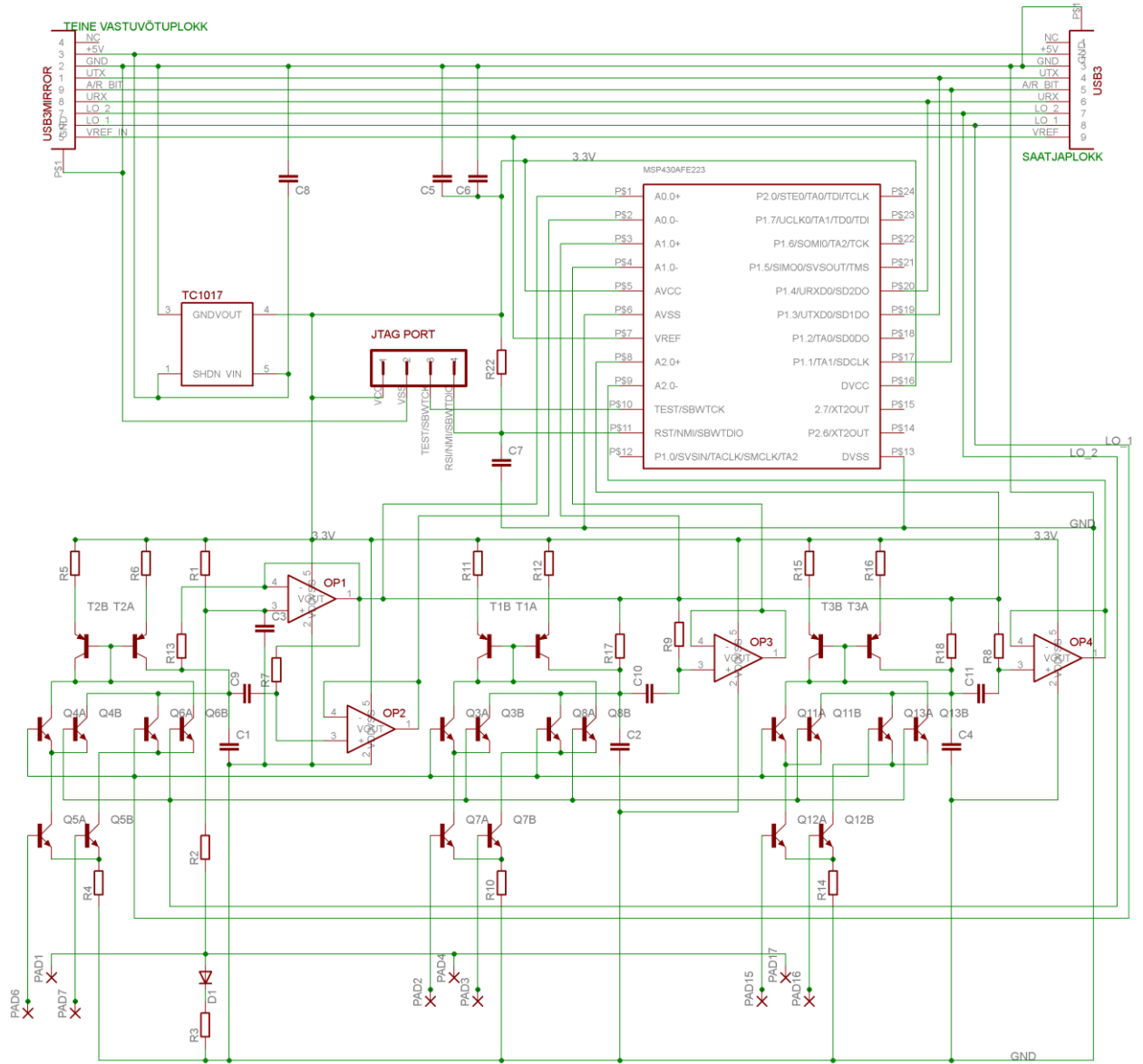
The most significant goal of the Foucault' cardiography method is observation of the mechanical activity of the human heart. In the present work this goal was not set, however the device described above gives valuable basis for the further development, research and experiments in this field. In the future, necessity of the research on humans probably will arise and if successful, the method would bring a great benefit for medicine and cardiologists.

Kasutatud kirjandus

1. А. Ремизов, „Медицинская и биологическая физика“ / „Meditsiiniline ja bioloogiline füüsika,“ (Высшая Школа, Москва, 1987), стр. 320-321.
2. M. W. Davidson, „How a Metal Detector Works,“
http://www.thomasathomas.com/Metal_detectors_work.htm.
3. P. Tarjan, R. McFee, „Electrodeless Measurements of the Effective Resistivity of the Human Torso and Head by Magnetic Induction,“ IEEE T BIO-MED ENG, Vol. 15, 266-278 (1968).
4. R. Guardo, S. Trudelle, A. Adler, C. Boulay, P. Savard, „Contactless Recording Of Cardiac Related Thoracic Conductivity Changes,“ IEEE-EMBC and CMBEC, Vol. 49, 1581-1582 (1995).
5. J. Trolla, L.-H. Humal, „Design of a Foucault Cardiograph,“ in *Proc. Int. Conf. Biomedical Engineering*, (Kaunas, Lithuania, 1998), pp. 45-51.
6. J. Heller, J. R. Feldkamp, „Auto-Tuned Induction Coil Conductivity Sensor for In-Vivo Human Tissue Measurements,“ MEAS SCI REV, Vol. 9, 162-168 (2009).
7. L.-H. Humal, J. Vedru, „Physiological Measurement Based on Foucault Principle: Set-up of the Problem,“ MBEC, Vol. 34, 183-184 (1996).
8. Wikipedia, „Product detector,“ http://en.wikipedia.org/wiki/Product_detector.
9. J. Stoltenberg, „The Phase Sensitive (In-Lock) Detector,“ (2005)
<http://courses.washington.edu/phys431/lock-in/lockin.pdf>.
10. P. Fastland, „Current Mirror,“ <http://www.falstad.com/circuit/e-mirror.html>.
11. Texas Instruments, „MSP430x2xx Family User's Guide,“ (2012)
<http://www.ti.com/lit/ug/slau144i/slau144i.pdf>.
12. Texas Instruments, „MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER,“ (2011)
<http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/msp430afe221.pdf>.

Lisad

Lisa 1



Lisa 2

```
#include "msp430afe223.h"                                ; #include fail bittide
                                                         ; nimetustega ja nende
                                                         ; aadressidega

;-----
                ORG      0F800h                        ; Programmi Reset
;-----
RESET          mov.w    #0280h, SP                    ; Stackpointer'i
                                                         ; initsialiseerimine
StopWDT        mov.w    #WDTPW+WDTHOLD, &WDTCTL      ; WDT Peatamine

SetupSD24
                mov.w    #SD24SSEL_0+SD24DIV_3+SD24REFON, &SD24CTL ; MCLK
                                                         ; taktisageduse jagaja = 8
                                                         ; kasutame sisemist ref. pinget
                mov.b    #SD24INTDLY_1, &SD24INCTL0   ; kolmas lugem tekitab
                                                         ; katkestust
                                                         ; ehk paneb #SD24IFG lippu
                mov.w    #SD24OSR_128+SD24DF, &SD24CCTL0 ; OSR=128, tulemused
                                                         ; esitatud täiendkoodis

SetupUSART
                bis.b    #SWRST+CHAR, &U0CTL          ; reset-olek, 8-bit
                mov.b    #SSEL1+TXEPT, &U0TCTL        ; SMCLK=8MHz
                mov.b    #UTXE0+URXE0, &ME1           ; Lubame saata ja võtta vastu
                mov.b    #0x45, &UBR00                ; andmevahetus kiirus 115200kbps
                mov.b    #0x00, &UBR10                ;
                mov.b    #0xAA, &UMCTL0               ;
                bic.b    #SWRST, &UCTL0               ; reset-oleku tühistamine

SetupPort1
                bic.b    #BIT1, &P1DIR                ;
                bic.b    #BIT1, &P1SEL                ; P1.1 - sisendbitt
                bic.b    #BIT3, &P1SEL2               ;
                bis.b    #BIT3, &P1SEL                ; P1.3 = UTXD0
                bic.b    #BIT4, &P1SEL2               ;
                bis.b    #BIT4, &P1SEL                ; P1.4 = URXD0

SetupDCO
                mov.b    &CALBC1_8MHZ, &BCSCTL1        ; DCO kella sagedus
                mov.b    &CALDCO_8MHZ, &DCOCTL        ;

                clr      R14
                clr      R15

main
                bit.b    #BIT1, &P1IN                  ; vaatame mis seisus on P 1.1
                jz        main                        ; ootame positiivset
                                                         ; poolperioodi

main1
                bit.b    #BIT1, &P1IN                  ; vaatame mis seisus on P 1.1
                jnz       main1                      ; ootame negatiivset
                                                         ; poolperioodi

;Negatiivne poolperiood
```

NFAAS

```
bis.w    #SD24SC, &SD24CCTL0    ; Alustame muundamist
bic.w    #SD24IFG, &SD24CCTL0    ;
clr.w    R10
clr.w    R5
```

NF0

```
bit.w    #SD24IFG, &SD24CCTL0    ; Kontrollime, kas tulemused on
                                     ; saadaval?
jnz      NF1                      ; on saadaval

bit.b    #BIT1, &P1IN            ; vaatame mis seisus on P 1.1
jz       NF0                     ; ootame positiivset faasi

bic.w    #SD24SC, &SD24CCTL1      ; Peatame muundamist
bis.w    #SD24SC, &SD24CCTL1      ; Alustame muundamist
bic.w    #SD24IFG, &SD24CCTL1
jmp      PFAAS1
```

NF1

```
mov.w    &SD24MEM0, R4            ; paneme tulemus R4-sse
bic.w    #SD24IFG, &SD24CCTL0      ; kustutame katkestuslippu
inc.w    R10                     ; loendame tulemusi

rra.w    R4                      ; R4 sisu nihutamine
rra.w    R4                      ; 4 biti võrra
rra.w    R4
rra.w    R4
add.w    R4, R5                  ; summeerime tulemusi
```

;Positiivne poolperiood

PFAAS1

```
clr      R11
clr      R6
```

PFAAS2

```
bit.w    #SD24IFG, &SD24CCTL0      ; Kontrollime, kas tulemused on
                                     ; saadaval
jnz      PF1                      ;
bit.b    #BIT1, &P1IN            ; vaatame mis seisus on P 1.1
jnz      PFAAS2                  ; ootame negatiivset faasi

bic.w    #SD24SC, &SD24CCTL1      ; Peatame muundamist
mov.w    R5, R12
mov.w    R6, R13

; lahutame negatiivse poolperioodi jooksul saadud tulemustest
; tulemused, mis on saadud positiivse poolperioodi jooksul
sub.w    R12, R13
mov.w    R13, R5
jmp      KESK                    ; keskmistamisprotseduur
```

PF1

```
mov.w    &SD24MEM0, R4            ; LSB
bic.w    #SD24IFG, &SD24CCTL0      ; kustutame katkestuslippu
inc.w    R11                     ; loendame tulemusi

rra.w    R4                      ; R4 sisu nihutamine 4 biti võrra
rra.w    R4
```

```

rra.w    R4
rra.w    R4

add.w    R4, R6                ; summerime tulemusi
jmp      PFAAS2

KESK

add.w    R13,R15;              ; liidame lahutatud tulemusi
inc      R14;                  ; loendame neid
cmp.w    #0x0008,R14;         ; võrdleme loendurit 8-ga
jeq      SEND                  ; 8 tulemust on summeritud
jmp      main

;Saamine UART'iga
SEND

rra      R15                    ; jagame tulemus 16-ga
rra      R15                    ; (nihutame 4 bitti paremale)
rra      R15
rra      R15

test1

bit.b    #UTXIFG0, &IFG1      ; kontrollime kas UART on valmis
jz       test1                 ; järgmist baiti saatma
;
mov.b    R15, &U0TXBUF        ; R15 tulemused saadame
; TX'i (LSB osa)

clr      R5                    ; nullistame registrite sisu
clr      R6                    ;
clr      R13
clr      R12
clr      R14
clr      R15

jmp      main                  ; hüpe main meetodisse

;-----
;      Katkestusvektorid
;-----
ORG      0FFFEh                ; MSP430 RESET vektor
DW       RESET                 ;
END

```